

На правах рукописи



**Сатышев Антон Сергеевич**

**МЕТОД КОНТРОЛЯ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ РЕЗАНИЮ  
ДИСКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С РАЗЛИЧНЫМ  
РАДИУСОМ ЗАКРУГЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ**

Специальность 05.11.13 —  
«Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и  
изделий»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Красноярск — 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Ганжа Владимир Александрович**

Официальные оппоненты: **Суржиков Анатолий Петрович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение контроля и диагностики инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности,  
руководитель отделения

**Воскресенский Геннадий Гаврилович**,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», кафедра «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле»,  
и.о. заведующего кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Защита состоится 19 сентября 2019 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.099.26, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26 ауд. УЛК 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета [www.sfu-kras.ru](http://www.sfu-kras.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филлипович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Для выполнения программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года», утвержденной постановлением правительства, необходимо реализовать стратегию, согласно которой предусмотрена интеграция Арктической зоны с основными районами России посредством: освоения и разработки месторождений углеводородов, цветных и драгоценных металлов; формирования опорной сети автомобильных дорог и современных транспортно-логистических узлов; развития, реконструкции и модернизации аэропортовой сети.

Это повлечет за собой необходимость содержания вновь построенных и реконструированных автомобильных дорог и аэродромов в зимний период. Общая же протяжённость российской сети автомобильных дорог общего пользования оценивается в 1 507 750,7 км, в том числе 53 070,5 км федерального значения, что на 15 % больше в сравнении с 2015 годом. 70 % из них расположено в зонах, где длительность зимнего периода достигает в среднем  $220 \div 240$  дней в году.

Содержание дорог различного назначения, аэродромов и вертолетных площадок в Арктической зоне и зонах с холодным климатом с увеличением протяженности, грузонапряжённости и интенсивности движения с каждым годом становится все более трудоемким и ресурсоемким. Наиболее сложным, затратным и ответственным является зимнее содержание автомобильных дорог, аэродромов и вертолетных площадок. Среди основных задач зимнего содержания автомобильных дорог можно выделить механический метод удаления снежно-ледяных образований с помощью отвальных (плужных), щёточных, шнекороторных, фрезерно-роторных и других рабочих органов дорожных машин. Однако, в случае формирования прочных снежно-ледяных образований качественная очистка рабочими органами, перечисленными выше затрудняется или становится невозможной. Это обусловлено их физико-механическими свойствами: плотность  $\rho = 0,6 \div 0,9 \text{ г/см}^3$ ; предел прочности на сжатие  $\sigma = 2,5 \div 2,8 \text{ МПа}$ ; толщина слоя  $h \leq 100 \text{ мм}$ ; температура исследуемой среды  $-2 \div -10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Из всего выше перечисленного можно заключить, что потребуется разработка и внедрение современных высокоэффективных рабочих органов дорожных машин для зимнего содержания, адаптированных к использованию в арктических условиях.

Для повышения эффективности и снижения энергоёмкости при удалении прочных снежно-ледяных образований в работах В.А. Ганжи предложено применение дискового инструмента. Однако, с применением дискового инструмента встает вопрос создания высокоэффективных рабочих органов, для проектирования которых необходимо заранее знать нагрузочные параметры, величина которых зависит от множества факторов. Например, таких как: скорость резания, геометрические параметры инструмента, температура окружающей среды, степень износа режущей кромки.

Дисковый режущий инструмент получил широкое освещение в области горнодобывающей промышленности, а именно, широко применяется в проходческих комбайнах при разработке горных пород. Существует множество работ таких авторов как Л.И. Барон, А.Н. Зеленин, Г.Г. Воскресенский, и др., рассматривающих влияние различных факторов на силу сопротивления резанию. Однако, в этих работах рассматривается либо резание грунтов и горных пород, и не уделено внимание прочным снежно-ледяным образованиям и льду (как частному их случаю), либо резание производится не дисковыми инструментами. Для более объективного изучения процесса взаимодействия дискового инструмента с прочными снежно-ледяными образованиями, опираясь на работы Л.И. Барона, предлагается контролировать три составляющие силы резания: горизонтальную, боковую и вертикальную. Контроль этих составляющих непосредственно на рабочем органе мало эффективен, так как невозможно изолировать влияние температуры и прочих внешних факторов. В работе В.А. Ганжи рассматривается влияние геометрических параметров на силу сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию. Влияние же степени износа режущей кромки на силу сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию изучено недостаточно. Поэтому поиск новых методов расчета и обоснование рабочих параметров, учитывающих степень износа режущей кромки дискового инструмента является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Исследованиями процессов взаимодействия дискового инструмента с горными породами, мерзлыми и не мерзлыми грунтами занимались ученые: Л.И. Барон, Л.Б. Глатман, С.Л. Загорский, А.Н. Зеленин, Г.Г. Воскресенский, А.П. Куляшов, В.М. Козин, Р.Б. Желудкевич и др.

**Целью** данной работы является усовершенствование существующего аналитического метода контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований разрушению дисковым режущим инструментом путем одновременного учета радиуса закругления и параметров среза.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать метод контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом, учитывающий влияние радиуса закругления режущей кромки и параметров среза.

2. Разработать программно-аппаратный комплекс позволяющий регистрировать и обрабатывать данные получаемые в процессе взаимодействия дискового инструмента с прочными снежно-ледяными образованиями.

3. Провести экспериментальные исследования влияния радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента и параметров среза на силу сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию.

4. Расширить известную аналитическую методику расчета силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом путем введения эмпирического коэффициента учета влияния радиуса закругления режущей кромки.

### **Научная новизна:**

1. Разработан метод контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом, отличающийся тем, что позволяет учитывать радиус закругления режущей кромки и параметры среза.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс отличающийся тем, что позволяет производить предварительную обработку экспериментальных данных, их статистический анализ и оценку, а также оценивать природу изучаемого процесса на основе анализа фотографий продуктов разрушения.

3. Получены данные демонстрирующие зависимость составляющих силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию от радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента и параметров среза, а также статистические данные характеризующие природу изучаемого процесса.

4. Расширена аналитическая методика расчета составляющих силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию отличающаяся тем, что позволяет учитывать влияние радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента и параметры среза.

**Практическая значимость.** На основе теоритических и экспериментальных исследований расширена и внедрена аналитическая методика контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований разрушению дисковым режущим инструментом. Также, разработан программно-аппаратный комплекс позволяющий производить предварительную обработку экспериментальных данных, их статистический анализ и оценку, а также оценивать природу изучаемого процесса на основе анализа фотографий продуктов разрушения.

**Методология и методы исследования.** Решение поставленных задач осуществлялось с применением тензoeлектрического метода измерения нагрузки. При выполнении работы применялись: поверенные стандартные и специально разработанные автором средства контроля; теория планирования и обработки результатов экспериментальных исследований; методы математической статистики и регрессионного анализа.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом, включающий комплексную оценку влияния радиуса закругления режущей кромки и параметров среза.

2. Расширенная аналитическая методика контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований разрушению дисковым режущим инструментом, учитывающая влияние радиуса закругления режущей кромки.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается экспериментально и теоретически, экспериментальные результаты получены с использованием средств контроля прошедших поверку. Теоритические результаты при выполнении работы получены при использовании положений механики разрушения твердых тел, теории упругости, выводы подтверждены экспериментально. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы представлены на: международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ») «Архитектура, строительство, транспорт» (Омск, 2015 г.); на XVII международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2016 г.); на XIX международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2018 г.); а также на заседаниях кафедры Топливообеспечения и горючесмазочных материалов Института нефти и газа Сибирского федерального университета (Красноярск, 2015–2018 гг.)

**Личный вклад.** Автором лично разработан метод контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом, учитывающий влияние радиуса закругления режущей кромки и параметров среза и расширена аналитическая методика контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований разрушению дисковым режущим инструментом. Проведены исследования, согласно с разработанным методом, их статистическая и математическая обработка. В соавторстве с научным руководителем разработан программно-аппаратный комплекс, автором лично разработана конструкция тензометрического усилителя и программная часть комплекса для обработки и анализа данных.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 5 — в сборниках трудов конференций.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена обзору условий формирования снежно-ледяных образований и их физико-механических свойств, методов содержания дорожных покрытий, влияния радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента на силу сопротивления разрушаемой среды.

Установленно, что формирование снежно-ледяных образований на дорожных покрытиях наиболее вероятно при температуре воздуха  $-2 \div -8$  °С и относительной влажности воздуха  $65 \div 85$  %, при разработке рабочего оборудования спецмашин для разрушения льда, характеристики его механических свойств, следует определять экспериментально, в конкретных местных условиях. Основными недостатками широко используемых методов зимнего содержания дорог являются конструктивная непригодность существующих рабочих органов для эффективного разрушения прочных снежно-ледяных образований.

Анализ методов контроля и средств измерения силы сопротивления разрушаемой среды показал, что предпочтительным методом контроля силовых

параметров рабочих органов строительно-дорожных машин является динамометрический метод с применением тензорезистивных датчиков, а также, что используемые в настоящее время средства контроля не имеют возможности проведения экспериментов по резанию массива с одновременным измерением трех составляющих силы резания без взаимного влияния друг на друга.

Для устранения недостатков необходимо разработать средство контроля, имеющее возможность крепления полноразмерного дискового режущего инструмента и учитывающее одновременно каждую составляющую силы резания без взаимного их влияния друг на друга.

Преимуществами использования динамометрического метода, для контроля силовых параметров рабочих органов строительно-дорожных машин при взаимодействии с разрушаемой средой, с применением тензорезистивных датчиков являются сравнительная простота в изготовлении, восприимчивость к статическим и динамическим нагрузкам, точность преобразования сигнала, надежность, доступность и низкая стоимость, а также высокий интегральный показатель.

На основе проведенного обзора и анализа состояния проблемы показана необходимость разработки новых, более информативных и менее трудоемких методов контроля.

**Вторая глава** посвящена разработке метода контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом, включающего комплексную оценку влияния радиуса закругления режущей кромки и параметров среза. Представлена известная аналитическая методика расчета силы сопротивления снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом. Суть которой заключается в последовательном вычислении горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих силы из выражений:

$$F_{гор} = P \times k_{ПП} \times t \times (\mu_1 \times \cos \delta + \sin \delta) \times \left( \sin \frac{\alpha_1}{2} + f_1 \times \cos \frac{\alpha_1}{2} \right) + F_{бок} \times \mu_1, \quad (1)$$

$$F_{бок} = P \times k_{ПП} \times t \times (\cos \delta - \mu_1 \times \sin \delta), \quad (2)$$

$$F_{верт} = P \times k_{ПП} \times t \times (\mu_1 \times \cos \delta + \sin \delta) \times (1 + f_1) \times \cos \frac{\alpha_1}{2}, \quad (3)$$

где  $P$  – давления на грани клина;  $k_{ПП}$  – коэффициент параметров разрушения;  $t$  – шаг резания;  $\mu_1$  – коэффициент внешнего трения стали о лед;  $\delta$  – угол заострения режущей кромки инструмента;  $\alpha_1$  – угол поворота дискового инструмента;  $f_1$  – коэффициент трения стали о бронзу.

Метод контроля силы сопротивления снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом предусматривает два этапа (см. рисунок 1).

На первом этапе осуществляются лабораторные исследования процесса взаимодействия дискового инструмента, имеющего различный радиус закругления режущей кромки и ледяного массива как предельного случая снежно-ледяных образований. *Образец*, приготовленный из поверхностного



Рисунок 1 — Структурная схема метода контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом

слоя льда пресноводного водоема, устанавливается в *лабораторную установку* оснащенную *измерительной системой*. Особенностью данной установки является отсутствие взаимного влияния составляющих силы сопротивления резанию друг на друга, это достигается путем оптимального размещения тензорезисторов на упругом элементе. Полученные *измерительной системой* сигналы и фотографии продуктов разрушения ледяного массива подвергаются обработке *программным комплексом* по определенному алгоритму. Отличающимися особенностями данного алгоритма являются: отброс грубых ошибок измерений, фильтрация в частотной области с удалением смещения нуля, кластеризация продуктов разрушения на группы по их размеру.

На втором этапе метода контроля силы сопротивления снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом производится получение полиномиальных зависимостей коэффициентов учета радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента.

Для оценки сходимости расчетных и экспериментальных значений составляющих силы сопротивления льда резанию была проведена серия экспериментов при радиусе закругления режущей кромки дискового инструмента  $R \approx 0$  мм и шагах резания  $t = 10 \div 60$  мм, что соответствует одной из серий экспериментов проведенных в работе В.А. Ганжи. Коэффициенты детерминации аналитических значений горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих силы



сопротивления льда резанию от экспериментальных равны 0,733, 0,946, 0,845 соответственно. Это свидетельствует о хорошей сходимости данных, а также о возможности использования экспериментальных значений для получения коэффициентов влияния радиуса закругления режущей кромки.

Коэффициенты влияния радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента на составляющие силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию, вычисляются по формуле:

$$k(R, t)_R = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 c_{i, j} \times R^i \times t^j, \quad (4)$$

где  $c_{i, j}$  – коэффициент полинома, зависит от текущей рассчитываемой составляющей и вычисляется регрессионным алгоритмом *программного комплекса*;  $i, j$  – степени полинома.

Также отличительно особенностью регрессионного алгоритма является возможность получить как можно более простую модель и не потерять значимых характеристик в её поведении.

Разработанный метод контроля силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом позволяет получить статистические данные о количестве и размере продуктов разрушения, связанные с изменением радиуса закругления режущей кромки и параметров среза, а так же полиномиальные зависимости, вносящие в известную методику учет радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента.

**Третья глава** посвящена разработке программно-аппаратного комплекса для апробации вышеописанного метода. Представлена измерительная установка (пат. №2429459). При помощи САПР Solid Works проведены исследования напряженно-деформированных состояний 3D-модели упругого элемента в сборе с П-образным кронштейном, которые позволили выявить оптимальные по расположению места наклейки тензорезисторов, а также минимизировать взаимное влияние составляющих силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию друг на друга. Результаты исследования приведены на рисунке 2.

Величина максимальных эквивалентных напряжений материала упругого элемента (сталь 50ХФА) составила: 46,832 МПа для горизонтальной составляющей; 34,023 МПа для боковой составляющей; 6,683 МПа для вертикальной составляющей. При этом, тридцатипроцентное ограничение по пределу текучести, предписанное для материалов тензометрических элементов, для стали 50ХФА составляет 324 МПа. Следовательно, возникновение пластических деформаций в материале тензометрического элемента при его работе будет исключено, а влияние гистерезиса на точность измерений сведено к минимуму.

Получаемый сигнал с тензорезисторов передается в тензометрический усилитель отличающийся тем, что позволяет подстраивать баланс всех мостовых схем перед проведением очередного опыта, что в свою очередь обеспечивает получение более надежных данных. Впоследствии усиленный сигнал оцифровывается платой L-154.

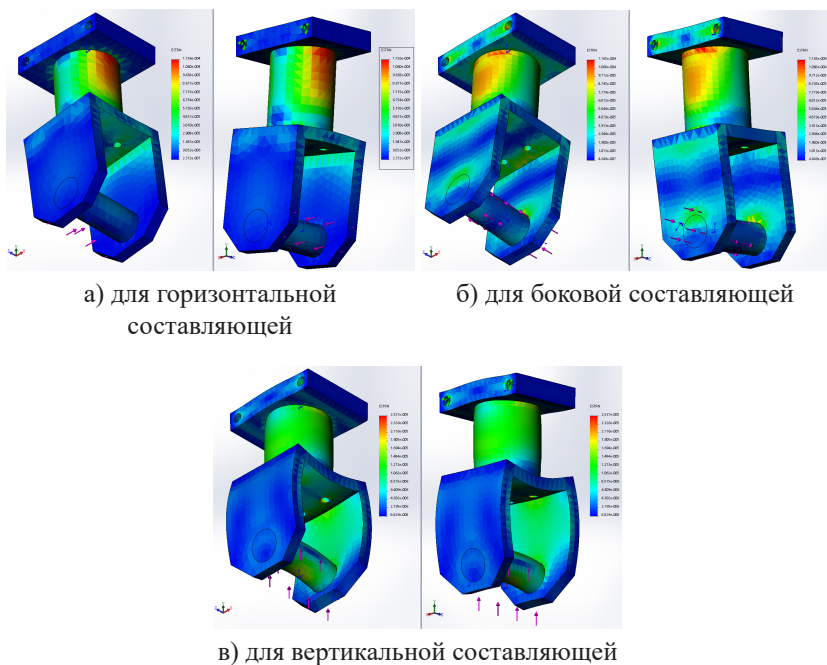
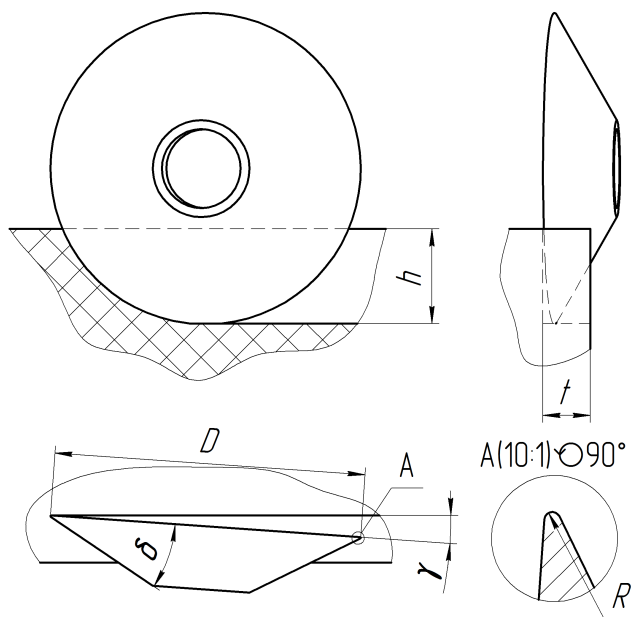


Рисунок 2 — Диаграммы распределения эквивалентных деформаций

Оцифрованные данные обрабатываются *программным комплексом* в несколько этапов по определенным алгоритмам. Особенностью обработки является отброс грубых ошибок измерений, на первом этапе, удаление смещения нуля путем нахождения частотных характеристик шума, на втором этапе, нахождение точечной оценки действующего значения составляющих силы. Также одной из характерных особенностей *программного комплекса* является возможность обработки фотографий продуктов разрушения. Результатом работы комплекса является сводная таблица значений составляющих силы сопротивления резанию и таблица процентного соотношения продуктов разрушения по своему геометрическому размеру. Полученные табличные данные обрабатываются алгоритмами регрессионного анализа описанными в данной главе.

**Четвертая глава** посвящена лабораторным исследованиям влияния радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента на силу сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию. На рисунке 3 изображена схема взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемым массивом.

При проведении экспериментальных исследований использовались дисковые режцы с различным радиусом закругления рабочей кромки  $R = [0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5]$  мм. Данный диапазон значений обусловлен результатами исследованиями изнашивания режущей кромки проведенными в работе Л.И. Барона. Скорость резания:  $0,51 \text{ м/с}$  ( $1,84 \text{ км/ч}$ ). Температура окружающего



$R$  — радиус закругления рабочей кромки;  $t$  — шаг резания;  $D$  — диаметр дискового резца;  $\delta$  — угол заострения;  $h$  — глубина резания;  $\gamma$  — задний угол.

Рисунок 3 — Схема взаимодействия дискового режущего инструмента с разрушаемым массивом

воздуха:  $-2^{\circ}\text{C} \div -7^{\circ}\text{C}$ . Остальные параметры дискового режущего инструмента приняты следующими: диаметр:  $D = 200$  мм.; угол заострения:  $\delta = 30^{\circ}$ ; глубина резания:  $h = 60$  мм.; шаг резания:  $t = [10; 20; 30; 40; 50]$  мм.; задний угол:  $\gamma = 3^{\circ} \div 5^{\circ}$ ; материал: термообработанная сталь 40XH (HRC 52 – 54). Выполнено тарирование тензометрического элемента при помощи стенда (пат. №2500983). Число повторных опытов принято равным 5.

Описана методика проведения экспериментальных исследований. Приведена таблица результатов экспериментальных исследований влияния радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента и параметров среза на составляющие силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию. Получены обработанные фотографии образующихся продуктов разрушения с цветовой маркировкой их геометрического размера. Осуществлен анализ продуктов разрушения.

При малых шагах резания и радиусах закругления режущей кромки периодичность сколов достаточно высока и скальвание происходит при малых разрушающих напряжениях без резких всплесков и спадов усилий, что характерно для пластического разрушения. Однако, при увеличении любого из исследуемых параметров выкалывание укрупняющихся фрагментов льда сопровождается резким высвобождением энергии сцепления частиц льда и выбросом

фрагментов разрушения из зоны резания. Это особенно хорошо заметно на больших радиусах закругления режущей кромки. Данный факт свидетельствует о том, что кроме формирования уплотненного ядра, перед режущей кромкой происходит образование опережающих трещин, что характерно для упругого и неустойчивого хрупкого разрушения материалов.

В **пятой главе** приведена усовершенствованная методика математического расчета силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом.

Осуществлена оценка полученных зависимостей контролируемой величины от радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента и параметров среза.

Горизонтальная составляющая силы, действующей на дисковый режущий инструмент при разрушении снежно-ледяных образований по полублокированной схеме резания с учетом радиуса закругления рабочей кромки:

$$F(R, t)_{\text{гор}} = P \times k_{\text{ПП}} \times k(R, t)_R \times t \times (\mu_1 \times \cos \delta + \sin \delta) \times \left( \sin \frac{\alpha_1}{2} + f_1 \times \cos \frac{\alpha_1}{2} \right) + F(R, t)_{\text{бок}} \times \mu_1. \quad (5)$$

Боковая составляющая силы, действующей на дисковый режущий инструмент при разрушении снежно-ледяных образований по полублокированной схеме резания с учетом радиуса закругления рабочей кромки:

$$F(R, t)_{\text{бок}} = P \times k_{\text{ПП}} \times k(R, t)_R \times t \times (\cos \delta - \mu_1 \times \sin \delta). \quad (6)$$

Вертикальная составляющая силы, действующей на дисковый режущий инструмент при разрушении снежно-ледяных образований по полублокированной схеме резания с учетом радиуса закругления рабочей кромки:

$$F(R, t)_{\text{верт}} = P \times k_{\text{ПП}} \times k(R, t)_R \times t \times (\mu_1 \times \cos \delta + \sin \delta) \times (1 + f_1) \times \cos \frac{\alpha_1}{2}. \quad (7)$$

Гладкая поверхность полученная с помощью выражения 5 представлена на рисунке 4. Её анализ показывает, что величина  $F_{\text{гор}}$  с увеличением радиуса закругления  $R$  меняется нелинейно. Четко прослеживается два локальных минимума  $\approx 72 \text{ Н}$  и  $\approx 50 \text{ Н}$  в областях с радиусом закругления от 0,5 до 1 мм и от 2,5 до 4 мм на шагах от 45 до 50 мм и от 27,5 до 37,5 мм соответственно. Область второго локального минимума имеет форму эллипса, большая полуось которого расположена параллельно оси  $OR$ . Также, виден максимум 928 Н в окрестностях  $R = 4.5 \text{ мм}$  и  $t = 45 \text{ мм}$ . Такое поведение обуславливается характером разрушения льда.

Локальный минимум в области  $R = 2,5 \div 4 \text{ мм}$   $t = 27,5 \div 37,5 \text{ мм}$  связан с увеличением количества сколов материала и укрупнением возникающих осколков, что ведет к уменьшению действующего значения силы. В момент откола

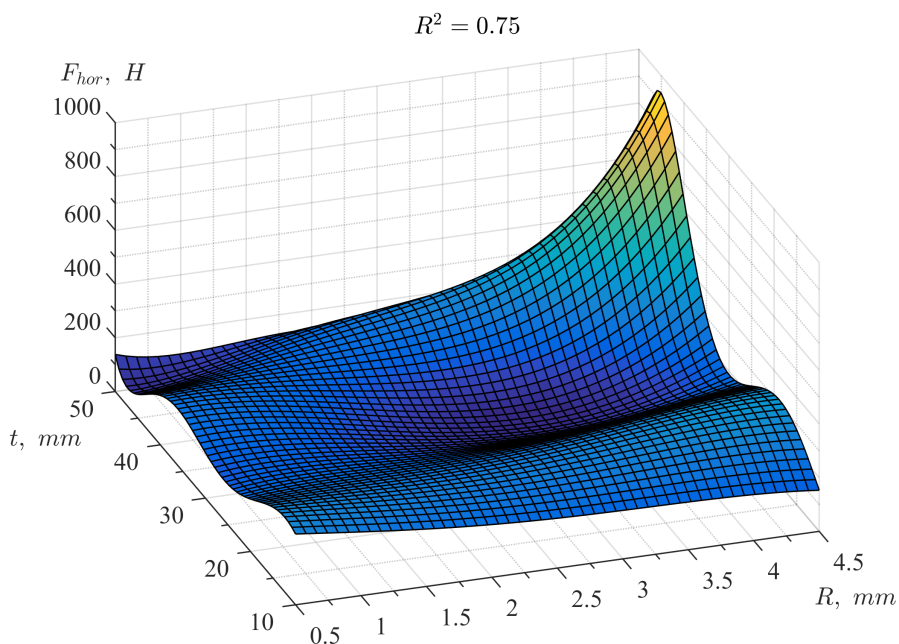


Рисунок 4 — Зависимость горизонтальной составляющей силы сопротивления снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом от радиуса закругления рабочей кромки  $R$  и шага резания  $t$

очередного фрагмента ледяного массива дисковый резец перестает испытывать сопротивление движению. Выявленную закономерность можно сравнить с коэффициентом заполнения, применяющимся в электронике для описания периодических сигналов, причем значение этого коэффициента зависит от процента образовавшейся стружки и преобладающего размера осколков.

В результате комплексной оценки зависимостей составляющих контролируемой величины от радиуса закругления рабочей кромки и шага резания установлено, что радиус закругления рабочей кромки в большей степени влияет на боковую составляющую силы сопротивления резанию, а шаг резания на горизонтальную и вертикальную составляющие силы резания. Минимальное значение результирующей силы сопротивления резанию достигается в области ограниченной радиусом закругления от 3,5 до 4 мм и шагом резания от 28 до 33 мм. Данная область является пересечением эллиптических областей минимальных значений каждой из составляющих.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе анализа условий формирования и физико механических свойств прочных снежно-ледяных образований сделан вывод о конструктивной непригодности существующих рабочих органов для эффективного их разрушения. Поэтому предлагается использовать для этих целей дисковый режущий инструмент. Эффективность и перспективность применения такого инструмента, обуславливается тем, что при взаимодействии с разрушаемой средой трение скольжения режущей кромки заменяется трением качения, в результате чего уменьшаются динамические нагрузки на навесное оборудование, а также уменьшается в десятки раз путь трения. Изменение радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента сменных рабочих органов при резании различных материалов влияет на силы, возникающие на нем. Однако, результаты известных исследований процессов взаимодействия режущего инструмента с горными породами, мерзлыми и не мерзлыми грунтами не могут быть использованы при проектировании рабочих органов с дисковым режущим инструментом для разрушения прочных снежно-ледяных образований без проведения дополнительных исследований.

2. Разработаны метод и комплекс средств контроля нагрузочных параметров дискового инструмента для разрушения прочных снежно-ледяных образований, позволяющие одновременно измерять горизонтальную, боковую и вертикальную составляющие силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию, возникающей на дисковом режущем инструменте при изменяющемся радиусе закругления режущей кромки и шаге резания.

3. Проведены лабораторных исследований влияния радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента и параметров среза на силу сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию в соответствии с принятой программой эксперимента.

4. Рекомендуется, при выполнении подобных исследований производить взвешивание просеянных продуктов разрушения, так как статистические данные полученные в ходе обработки фотографий показали явную зависимость влияния как параметров среза так и радиуса закругления режущей кромки на характер разрушения и соответственно на действующее значение силы сопротивления резанию.

5. Усовершенствована математическая модель процесса взаимодействия дискового инструмента с прочными снежно-ледяными образованиями, состоящая из трех аналитических уравнений для горизонтальной, боковой и вертикальной составляющих силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию, позволяющая исследовать степень влияния радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента и параметров среза на силу сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию.

6. Для автоматизации процессов вычислений и обработки был разработан комплекс программ в среде MatLAB, позволяющий обрабатывать данные, полученные в ходе лабораторных экспериментов, а также выводить полученные графические зависимости на печать. Также, комплекс позволяет обрабатывать

фотографии продуктов разрушения, образовавшихся в процессе взаимодействия дискового инструмента с разрушаемой средой и производить регрессионный анализ, а также строить трехмерные графики зависимости силы сопротивления прочных снежно-ледяных образований резанию от радиуса закругления режущей кромки дискового инструмента и шага резания.

7. В результате комплексной оценки зависимостей составляющих контролируемой величины от радиуса закругления режущей кромки и шага резания установлено, что радиус закругления режущей кромки в большей степени влияет на боковую составляющую силы сопротивления резанию, а шаг резания на горизонтальную и вертикальную составляющие силы резания.

8. Рекомендуется использовать для проектирования рабочих органов дорожных машин радиус закругления режущей кромки от 3,5 до 4 мм и шаг резания от 28 до 33 мм, так как именно в этих диапазонах достигается минимальное значение результирующей силы сопротивления резанию.

9. Разработана и внедрена «Методика расчета силы сопротивления снежно-ледяных образований резанию дисковым инструментом с различным радиусом закругления режущей кромки», позволяющая на стадии проектирования определить рациональный радиус закругления режущей кромки дискового инструмента, обеспечивающий минимальное значение результирующей силы сопротивления резанию, а также максимальную производительность процесса разрушения снежно-ледяных образований на покрытиях автомобильных дорог рабочими органами спецмашин с учетом физико-механических свойств льда и параметров среза.

**Перспективы дальнейшей разработки темы:** проверить экспериментально теорию самозатачивания дискового инструмента приведенную в работах Л. И. Барона применительно к прочным снежно-ледяным образованиям. Провести испытания дискового инструмента на реальных дорожных покрытиях. Исследовать возможность влияния на радиус закругления режущей кромки включений в прочные снежно-ледяные образования фрикционного материала, ранее распределенного по дорожному полотну.

## Публикации автора по теме диссертации

### В изданиях из списка ВАК РФ

1. *Сатышев, А. С.* Измерительный преобразователь лабораторного стенда для испытания рабочих органов специальных машин аэродромно-технического обеспечения / А. С. Сатышев, Ю. Н. Безбородов, В. А. Ганжа // Сибирский журнал науки и технологии. — 2018. — Т. 19, № 3. — С. 526–531.
2. *Сатышев, А. С.* Методика обработки экспериментальных данных при контроле нагрузочных параметров разрушения снежно-ледяных образований дисковым режущим инструментом / А. С. Сатышев, Ю. Н. Безбородов, В. А. Ганжа // Системы Методы Технологии. — 2018. — Т. 39, № 3. — С. 526–531.

### В сборниках трудов конференций

3. Измерительный комплекс для контроля силы сопротивления снежно ледяных образований резанию дисковым инструментом / А. С. Сатышев [и др.] // Измерение, контроль, информатизация : Материалы XVII международной научно-технической конференции / под ред. Л. И. Сучковой. — Барнаул, 2016. — С. 155–158.
4. Регрессионная модель процесса взаимодействия дискового режущего инструмента со снежно-ледяными образованиями / И. В. Каптюк [и др.] // Измерение, контроль, информатизация : Материалы XVII международной научно-технической конференции / под ред. Л. И. Сучковой. — Барнаул, 2016. — С. 207–210.
5. Модернизированный твердомер для контроля прочности аэродромных покрытий содержащихся под слоем уплотненного снега / В. А. Ганжа [и др.] // Измерение, контроль, информатизация : Материалы XVII международной научно-технической конференции / под ред. Л. И. Сучковой. — Барнаул, 2016. — С. 47–50.
6. *Сатышев, А. С.* Тензометрический усилитель для лабораторных испытаний дискового режущего инструмента / А. С. Сатышев, В. А. Ганжа // Измерение, контроль, информатизация : Материалы XIX международной научно-технической конференции / под ред. Л. И. Сучковой. — Барнаул, 2018. — Т. 2. — С. 117–121.
7. *Ганжа, В. А.* Обоснование выбора величины угла при вершине Конического индентора пенетрационного Прибора – твердомера / В. А. Ганжа, А. В. Ганжа, А. С. Сатышев // Измерение, контроль, информатизация : Материалы XIX международной научно-технической конференции / под ред. Л. И. Сучковой. — Барнаул, 2018. — Т. 1. — С. 70–73.